

文章编号: 0253-2239(2007)08-1494-4

# 基于衍射微透镜的光学加速度传感器设计\*

贾书海 孔维军 杨佳

(西安交通大学理学院光信息科学与技术系, 西安 710049)

**摘要:** 提出了一种基于菲涅耳衍射微透镜的新型光学加速度传感器,它能够解决导航系统中惯性传感器普遍存在的抗电磁干扰和电磁冲击能力差等缺陷。其传感原理是把一个反光膜平行地置于衍射微透镜的后方,加速度的变化会改变反光膜的位置,根据微透镜前方会聚点处光强的变化,感知加速度的大小。介绍了传感器及其动力学系统的工作原理,并对衍射微透镜和动力学系统的微弹性机械结构进行了设计和加工,最后对传感器的性能和误差进行了分析。原理验证性实验的结果表明这种新型光学加速度传感器的原理正确,并且结构简单,灵敏度高。

**关键词:** 光纤光学; 光学加速度传感器; 微机电系统; 菲涅耳衍射微透镜

中图分类号: TP212.14 文献标识码: A

## Design of Optical Acceleration Sensor Based on Diffractive Micro Lens

Jia Shuhai Kong Weijun Yang Jia

(Department of Optical Information Science and Technology, School of Science, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

**Abstract:** A novel optical acceleration sensor based on a Fresnel diffractive micro lens is presented. It can effectively solve the low immunity of inertial sensors widely used in navigation system towards electro magnetic interference and electro magnetic pulse. A reflecting membrane is parallelly located behind the diffractive micro lens and its displacement is determined by the acceleration. Acceleration is calculated by measuring variational light intensity at the frontal focal point of the lens. The principles of the sensor and its dynamic system are described, and both the diffractive micro lens and the micro spring-mechanical structure of the dynamic system were designed and fabricated. Moreover, the performance and error of the sensor were analyzed. The results of proof-of-principle experiments indicate that the principle of the novel sensor is correct and the sensor has merits of simple structure and high sensitivity.

**Key words:** fiber optics; optical acceleration sensor; micro-electro-mechanical system; Fresnel diffractive microlens

## 1 引 言

目前航空业导航系统中广泛采用的惯性传感器具有抗电磁干扰和电磁冲击能力差等缺陷<sup>[1]</sup>,解决的根本方法就是发展光学惯性传感器。其中陀螺仪已经取得了巨大进展,包括低成本的光纤陀螺<sup>[2]</sup>和高精度的激光陀螺<sup>[3]</sup>,但是与之相适应的光学加速度传感器的研究还不多,难以满足惯性导航系统发展的需要。

国内外正在研制的光学加速度传感器有马赫-曾德尔干涉型<sup>[4]</sup>、光纤光栅型<sup>[5]</sup>、光弹效应型<sup>[6,7]</sup>、光

波导型<sup>[8]</sup>等几种,其中马赫-曾德尔干涉型和光纤光栅型具有较高的灵敏度,但是它们分别存在易受温度等外界环境影响和信号解调复杂等缺陷;而基于光弹效应原理的加速度传感器结构相对复杂<sup>[6]</sup>,环境温度的变化对光纤中光的相位的影响较大<sup>[7]</sup>;光波导型有利于一体化加工,但是存在光纤和波导耦合效率低的困难,难以实现加速度敏感头和探测电路的分离,即光与电的分离。

针对惯性导航技术发展的需要及加速度传感器的研究现状,设计了一种基于菲涅耳衍射微透镜的

\* 国家自然科学基金(10477015)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-05-0843)和陕西省科技攻关计划(2004K05-G14)、西安市科技攻关计划(GG05042)资助课题。

作者简介:贾书海(1969—),男,河北人,副教授,主要从事传感器、光电测试技术和微机电器件等方面的研究。

E-mail: shjia@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-13; 收到修改稿日期: 2007-01-29

新型微机电(MEMS)<sup>[9,10]</sup>光学加速度传感器,采用共光路干涉的敏感测量布局,显著改善传感器的稳定性;同时采用菲涅耳衍射微透镜实现传感头与光纤的光学耦合连接,有利于微光机电系统(MOEMS)集成。这种传感器具有抗电磁干扰和电磁冲击能力强、灵敏度高、稳定性好、动态响应范围大、成本低等优点。介绍了加速度传感器及其动力学系统的工作原理,关键器件的结构设计与加工,并对传感器的性能参量和误差影响进行了分析。

## 2 传感器的工作原理

### 2.1 传感器的光学敏感原理

基于菲涅耳衍射微透镜的新型微机电光学加速度传感器的结构如图 1 所示。菲涅耳衍射微透镜(以下简称“微透镜”)是通过铝金属膜蒸镀、光刻和刻蚀等方法在玻璃基片一侧加工出来的,其中奇数(或者偶数)半波带为透光带,偶数(或者奇数)为反光带。连接在微硅弹簧上的反光膜与玻璃基片上加工有微透镜的一侧平行相邻,并在反光膜上加工一个用来感知加速度的微质量。用单模光纤来传光,把光纤放在微透镜光轴上,其端部置于光轴上微透镜汇聚点处,光的发射和接收由同一根光纤来完成。其工作原理是:从光纤端部发出的光,经过微透镜和反光膜这一衍射系统,一部分被微透镜反光带反射回来,另一部分通过微透镜和反光膜这一衍射系统反射回来,两部分光在会聚点处发生干涉,光强的大小取决于两部分光的光程差,即光纤接收的光强随着反光膜位置的变化而改变,从而通过检测光纤中光强的变化就可以实现加速度的测量。

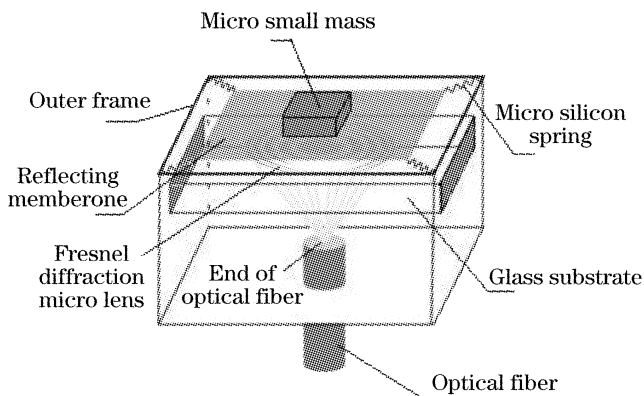


图 1 微机电光学加速度传感器的结构示意图  
Fig. 1 Sketch of the micro-electro-mechanical optical acceleration sensor

光纤接收的相对光强可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{(1+\rho)^2 [1 - \cos(2\beta)]}{2[\rho^2 + 1 - 2\rho\cos(2\beta)]}, \quad (1)$$

式中  $\beta = (2\pi/\lambda)d$ ,  $d$  为微透镜和反光膜之间的距离,  $\lambda$  为光波长;  $I_{\max}$  为会聚点光强的最大值, 对应于  $\beta = \pi/2$ ;  $\rho$  为玻璃表面的反射系数。

取  $\rho = 0.2$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  时, (1) 式的计算机模拟结果如图 2 所示, 由图中可知光强相对于  $\beta$  周期是  $\pi$ , 相对于  $d$  来说周期是  $\lambda/2$ , 所以传感器的输出对反光膜的位置变化十分敏感, 而反光膜上的微质量在外界加速度的作用下, 会改变反光膜的位置, 从而使传感器的输出对加速度十分敏感。图 2 中曲线上的标记点为线性响应最好的点, 是最佳的工作点, 根据精度和量程的要求选取最佳工作点附近一个适当的区域作为工作范围。

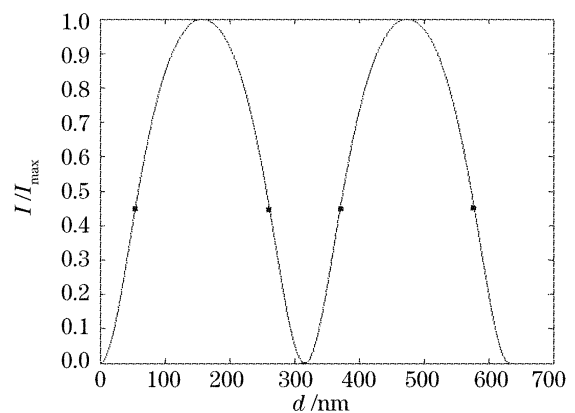


图 2 干涉光强与反光膜位置之间的关系

Fig. 2 Relationship between interference light intensity and position of reflecting membrane

### 2.2 传感器的动力学系统原理

微硅弹簧一端与反光膜固定连接, 另一端固定在传感器的外框架上, 在反光膜上加工出一个微质量, 这就形成了一个由微质量、反光膜、微硅弹簧和外框架构成的振动系统。

设被测物体的运动为  $x_s = a \sin \omega t$ , 用  $Y$  表示反光膜相对于微透镜的稳态响应的振动幅值, 则<sup>[11]</sup>

$$Y = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{a\omega^2}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}}, \quad (2)$$

其中  $a$  为被测物体的振幅,  $\omega$  为被测物体的振动频率,  $\omega_n$  为该振动系统的一阶固有频率,  $\zeta$  为阻尼比。当  $\omega_n \gg \omega$  时, (2) 式可以改写为

$$Y \approx \frac{a\omega^2}{\omega_n^2}, \quad (3)$$

其中  $a\omega^2$  为被测物体的加速度幅值。可见, 只要一阶固有频率远高于被测物体的振动频率, 反光膜与微透镜间相对运动的振幅  $Y$  正比于被测物体的加速度幅值  $a\omega^2$ 。而振幅  $Y$  可由检测光纤接收的光强来实现获取, 从而通过检测光强的变化来实现加速度的测量。

### 3 结构设计

#### 3.1 菲涅耳衍射微透镜的设计与加工

微透镜是由许多同心半波带构成,光从微透镜会聚点到相邻的半波带再返回到会聚点的光程差是 $\lambda/2$ 。图3是加工的微透镜在显微镜下的照片,它共有26个半波带,图中显示白色的半波带为反光带,黑色的为透光带。设它第 $n$ 个半波带的半径为 $r_n$ ,各半径的值如表1所示。微透镜的加工步骤是先在2.3 mm厚的石英玻璃基片上蒸镀一层均匀的铝反光膜,厚度控制在200~300 nm,然后用事先加工好的掩模板通过光刻、刻蚀等工艺将多余的铝刻蚀掉,加工出微透镜的图案,其会聚点在微透镜后方光轴上5 mm处。

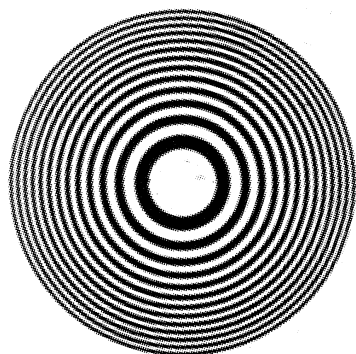


图3 加工的非涅耳衍射微透镜(放大100倍)

Fig.3 Fabricated Fresnel diffractive microlens (magnification ratio is 100)

表1 加工的非涅耳衍射微透镜的各半波带半径值  
Table 1 Radiuses of half-wave zones of fabricated Fresnel diffractive microlens

$n$	$r_n/\mu\text{m}$	$r_{10+n}/\mu\text{m}$	$r_{20+n}/\mu\text{m}$
1	45.8	152.1	210.1
2	64.8	158.8	215.1
3	79.4	165.3	219.9
4	91.7	171.6	224.6
5	102.5	177.6	229.3
6	112.3	183.4	233.8
7	121.3	189.0	
8	129.7	194.5	
9	137.5	199.9	
10	145.0	205.1	

#### 3.2 动力学系统的结构设计

针对这种新型微机电光学传感器对动力学系统的要求,设计了一种简单实用的一维振动系统,它包含传感器中的微硅弹簧、反光膜和微质量。它是由一个微弹性机械结构的四个臂端固定在外框架上构成,微弹性机械结构如图4(a)所示,四周是四个完全相同的弹性臂,相当于传感器中的微硅弹簧,单个弹性臂如图4(b)所示。在微弹性机械结构与微透

镜相邻的一侧镀有一层铝或银膜,构成了传感器中的反光膜。整个微弹性机械结构的当量质量相当于传感器中的微质量。微弹性机械结构的厚度以及弹性臂的宽度可以根据传感器性能对弹性系数和振动系统固有频率的要求来选取。整个结构可以在一块光滑等厚的硅片上通过光刻、深反应离子刻蚀、金属膜蒸镀等几步完成。

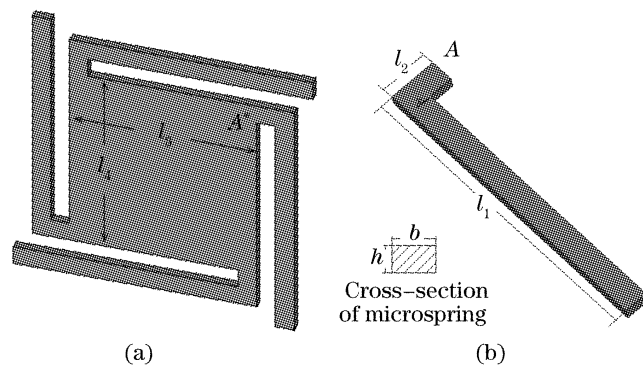


图4 微弹性机械结构及单个弹性臂结构示意图

Fig.4 Sketch of microspring-mechanical structure (a) and single spring arm (b)

### 4 性能分析

#### 4.1 性能模拟分析

由(3)式可知

$$a_m = a\omega^2 = d_m\omega_n^2, \quad (4)$$

其中 $a_m$ 为传感器的加速度量程, $d_m$ 是反光膜在设定工作区间内的最大振动范围。为了保证传感器的线性度,选取 $d_m = 30 \text{ nm}$ ,这样传感器的量程仅和振动系统的一阶固有频率 $\omega_n$ 有关,提高 $\omega_n$ 会提高传感器的量程,但是过高的量程会降低传感器的灵敏度,因此要根据传感器的量程、灵敏度和实际加工工艺要求合理地选择微弹性机械结构的参量。这里取微弹性机械结构厚度 $h = 300 \mu\text{m}$ ,弹性臂宽度 $b = 300 \mu\text{m}$ ,其他参量如下: $l_1 = 2600 \mu\text{m}$ , $l_2 = 400 \mu\text{m}$ , $l_3 = l_4 = 2000 \mu\text{m}$ ,各参量的含义如图4所示。硅弹性臂的弹性模量 $E = 1.69 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,剪切模量 $G = 7.26 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,硅密度 $\rho = 2.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,用 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的单色光作为光源,通过有限元数值模拟(ANSYS 8.0)得出四个弹性臂总的弹性系数是 $8.92 \times 10^4 \text{ N/m}$ ,振动系统的一阶固有频率是 $41.23 \text{ kHz}$ ,由此可得出传感器的量程约为 $\pm 51 \text{ m/s}^2$ ,测量频率范围取振动系统固有频率的20%,约为 $1 \sim 8.3 \text{ kHz}$ 。

#### 4.2 误差分析

由(2)式、(3)式可知,实际测量中存在着一个误

差因子

$$\delta = \frac{a'}{a} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}}, \quad (5)$$

其中  $a'$  和  $a$  分别是加速度的测得值和真实值。 $\delta$  和阻尼比  $\zeta$  与被测物体的频率  $\omega$  有关, 当  $\zeta = 0.65 \sim 0.70$  时  $\delta$  最接近 1<sup>[11]</sup>, 取  $\zeta = 0.65$  进行计算机模拟, 结果如图 5 所示。可以看出, 被测频率比较小的时候测得的加速度值更接近于真实值, 当  $\omega/\omega_n = 0.2$  时,  $\delta = 1.0054$ , 因此传感器在设定的频率范围 1~8.3 kHz 内的误差不大于 0.54%。

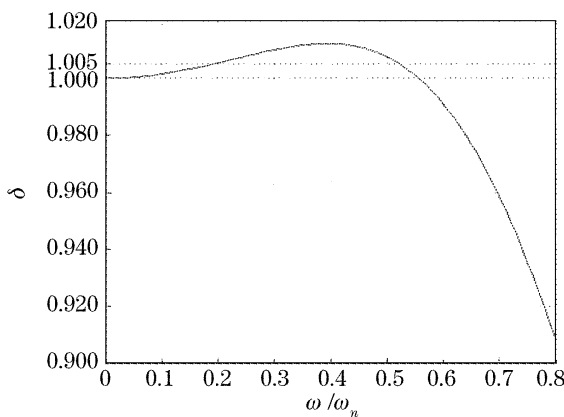


图 5 被测物体的频率对误差因子的影响曲线

Fig. 5 Curve of error coefficient versus frequency of measured object

### 4.3 实验验证

对这种新型传感器进行了原理验证性的初步加工和实验研究。微透镜背面以及光纤端面的菲涅耳反射对传感器的性能有较大影响, 实际加工时可以通过镀增透膜等方法来消除。原理实验时将激光器、耦合器、菲涅耳衍射微透镜、反光膜、探测器等固定在光学平台上, 用压电晶体调节反光膜和微透镜间的距离, 在示波器上就可以看到类似于图 2 的探测器输出, 实验中可以看到在这种干涉结构下, 干涉条纹的对比度较高, 可以保证传感器的灵敏度和精度。结果表明本文所提出的传感器方案是正确的、可行的。

## 5 结 论

设计了一种基于衍射微透镜的微机电光学加速度传感器, 介绍了其光学敏感原理和关键器件的设

计与加工, 并对其性能和误差进行了分析。这种传感器具有抗电磁干扰和电磁冲击、灵敏度高、动态响应范围大的优点, 并且所需的加工过程相对简单、体积小、成本低, 适合于批量制造。不仅适用于航空业的导航系统, 也适用于许多高电磁干扰环境和要求高精度传感的领域, 如舰艇、发电机组、核电站等, 具有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Jong-bin Yim, You-chol Lim, Joon Lyou. A stellar-inertial navigation scheme[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **6041**: 60412F
- 2 Xu Hongjie, Zhang Minju. Novel crystal integrated fiber optical gyroscope[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(10): 918~920 (in Chinese)  
徐宏杰, 章民驹. 新型组合晶体光纤陀螺的构想[J]. *中国激光*, 2001, **28**(10): 918~920
- 3 Long Xingwu, Huang Yun, Zhang Bin *et al.*. Theory analysis of ring laser gyroscope biased by ATR magnetic mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 989~993 (in Chinese)  
龙兴武, 黄云, 张斌等. 衰减全反射磁镜偏频激光陀螺的理论分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 989~993
- 4 Wu Bo, Chen Caihe, Zhang Xiaoling *et al.*. Structure design of M-Z interference MOMES accelerometer[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(11): 1263~1266 (in Chinese)  
吴波, 陈才和, 张晓玲等. M-Z 干涉型集成光学微加速度传感器结构设计[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(11): 1263~1266
- 5 M. Willsch, P. Krammer, N. M. Theune *et al.*. Highly sensitive micro mechanical fiber Bragg grating acceleration sensor combined with a new multiplexable interrogation principle[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4074**: 46~53
- 6 Masashi Ohkawa, Masayuki Izutsu, Tadasi Sueta. Integrated optic accelerometer employing a cantilever on silicon substrate [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1989, **28**(2): 287~288
- 7 Huang Yonghuan. Research and design of photoelastic fiber optic accelerometer[J]. *J. Tianjin Polytechnic University*, 2004, **23**(3): 61~64 (in Chinese)  
黄勇焕. 光弹光纤加速度传感器的研究与设计[J]. *天津工业大学学报*, 2004, **23**(3): 61~64
- 8 Jose A. Plaza, Andreu Llobera, Carlos Dominguez *et al.*. BESOI-based integrated optical silicon accelerometer [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2004, **13**(2): 355~364
- 9 Cao Zhonghui, Bao Junfeng, Yuan Ye *et al.*. A non-silicon-based 1×4 MEMS optic switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1041~1044 (in Chinese)  
曹钟慧, 鲍俊峰, 袁野等. 非硅基底 1×4 微机电系统光开关 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1041~1044
- 10 Kong Weijun, Jia Shuhai, Yang Jia. Computer simulation for the principle of a new optical acceleration sensor[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6149**: 614924
- 11 Ni Zhenhua. *Mechanics of Vibration* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989. 104~116 (in Chinese)  
倪振华. *振动力学* [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989. 104~116